

J-PARC における測量&アライメントの検討

三島 研二^{A)}、谷 教夫^{B)}

^{A)}(株)PASCOCO 〒153-0043 東京都 目黒区 東山 1-1-2

^{B)} 日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県 那珂郡 東海村 白方白根 2-4

概要

現在、日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構の統合計画として茨城県東海村に建設中の J-PARC は、南北に約 1000m、東西に約 500m の敷地に建設され、3GeV シンクロトロンで周長約 300m、50GeV のシンクロトロンで周長約 1500m の大型加速器である(図 2 参照)。また、J-PARC からニュートリノ振動実験のために岐阜県のカミオカンデの施設を含めると約 300km の巨大加速器実験施設と考えられる(図 1 参照)。このような大型加速器を設計図から現地に建設する場合、地球の曲率を考慮しなければならない。

本報告は、J-PARC が大型加速器であるための測量の問題点の検討結果と測量結果の報告である。

1 測量 & アライメントの問題点

1.1 カミオカンデとのリンク

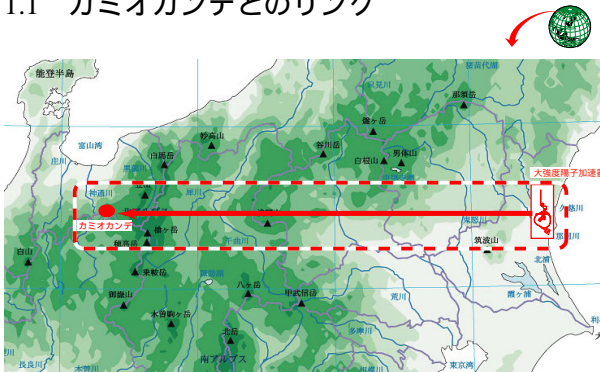


図 1 : J-PARC とカミオカンデの位置関係

図 1 のように J-PARC は約 300km に及ぶ大型加速器であると考えられる。その結果、地球の大きさ、曲率などの測地上の問題が顕著に生じる。

カミオカンデとのリンクでは、J-PARC 側のニュートリノビームラインの方向などを平面直角座標系のパラメータで明示されなければならない。

1.2 大型加速器であることの問題点

前述の『カミオカンデ』との結合を別にして、日本原子力研究所内の実験施設だけでも、南北に約 1km、東西に約 500m の施設であり、大型加速器であることに代わりない(図 2 参照)。その結果、地球の曲率の影響をうける。

2 測量 & アライメントの検討

2.1 検討した座標系

J-PARC とカミオカンデの結合のために最適な「測地座標系」を検討した。J-PARC とカミオカンデは各施設間の距離が約 300km 程度あるため、互いに見通しができないことはもちろんであり、地球の曲率の影響が顕著に現れる。測地座標系は、広範囲な測地測量で地球上の位置を表現することに適しているが、角度と距離の測定結果から直感的に位置を推測することは難しい。一度地球楕円体面に投影しなければならないからである。

一方、J-PARC 内では、水平角度と水平距離である程度直感的に位置を推測できる「平面直角座標系」がのぞましい。「平面直角座標系」の代表的なものに「公共座標系」がある。しかし、加速器のアライメントに公共座標系は適当ではない。したがって、3GeV 中心を原点とした、局地座標系(加速器座標系)の採用を検討した。

2.2 測地座標系

測地座標系は、一般的な『経緯度系(BL系)』とGPSなどで使用される『地心3次元座標系』があり、これらの測地系は地球規模の測地測量(大規模測地測量)を行う場合に必要となる。

日本国内の場合、今後学術的なものも含め、準楕円体GRS80による測地データが蓄積されていくことになる。したがって、『J-PARC で採用する準楕円体はGRS80が最適である。』

さらに、地心3次元座標系とは、地球の回転軸の北極方向を正としてZ軸とし、グリニッジ

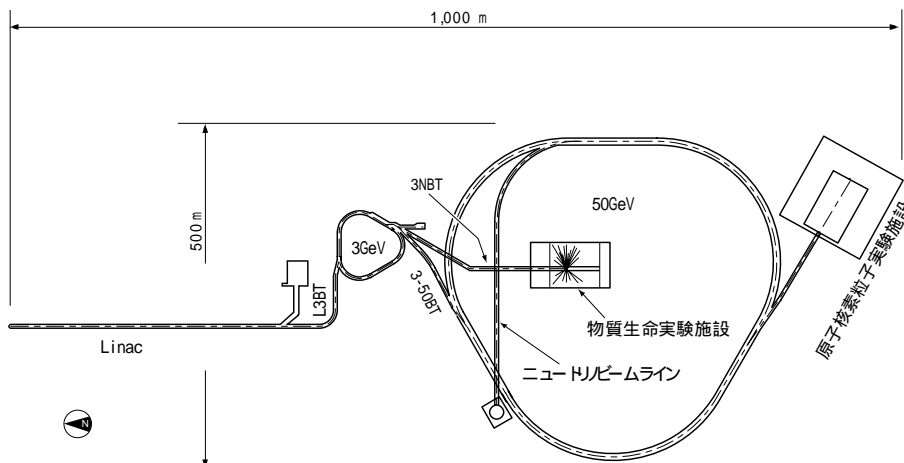


図 2 : J-PARC の概観図

天文台を通過する子午線上(経度 0°)に X 軸を取る右手系の座標系である。

わが国の場合、2002 年 4 月の「測量法の改訂」で『ITRF94 (International Terrestrial rotation Frame 1994)』が採用されている。他の地心 3 次元座標系として WGS84 (GPS で採用されている。)がある。また、この他に前回カミオカンデとリンクした際に採用している ITRF97、あるいはドイツの DESY の長距離線形加速器 TESLA で採用している ETRF97 (European Terrestrial Rotation Frame 1997) などがあるが、これらの地心 3 次元座標系が比較的新しい座標系なので ITRF94 との差はきわめて微量である。さらに、変換パラメータも確立されている。すなわち、必要に応じて相互に変換可能である。ITRF94 も GRS80 と同様に今後各種のデータが蓄積されていくことになる。

したがって、『J-PARC で採用する地心 3 次元座標系は ITRF94 が最適である。』

2.3 平面直角座標系

地球表面上でおこなわれた測定の結果を平面上に投影する場合、歪みが生ずる。投影法によって「距離」に歪みを吸収させる方法、あるいは「角度」に歪みを吸収させる方法がある。

J-PARC の施設は南北に約 1000m である。南北の両端で距離に測定した場合、平面直角座標系上では 40.71mm も短い距離で扱わなければならない。すなわち、公共座標系では、加速器のアライメントの精度に耐えられない。したがって、『加速器系の精密な座標系の設定が必要である。』

(1) 地球の曲率が水平距離に与える影響

地球の曲率の主なものに『子午線曲率半径』、『卯酉(ほうゆう)線曲率半径』、『垂直截線曲率半径』などがある。

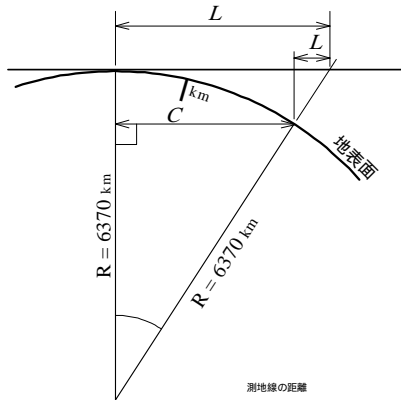


図 3：地球の曲率が水平方向に与える影響

図 3 のように曲率が距離に与える影響は、1km 測定したとき $12.4 \mu\text{m}$ の差であり、MEKOMETER ME5000 でも測定できない。また、レーザトラッカーは距離が長いので測定できない。

したがって、水平方向に与える地球の曲率の影響は無視できる。

(2) 曲率が高さ方向に与える影響

現地の経度、緯度がある程度わかっているのので、その経緯度で準楕円体 GRS80 上の子午線曲率半径による曲

率の影響を計算した(図 4 参照)。

原点に設定した平面と地球の形状の差がもっとも影響するのは、高さ方向である(表 1 参照)。

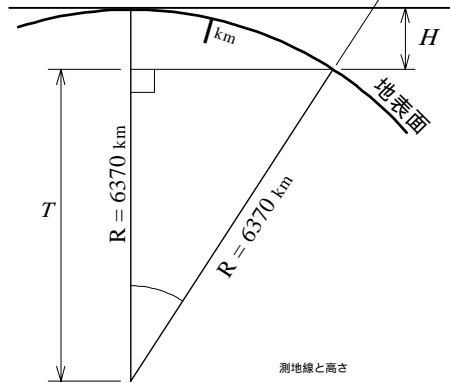


図 4：曲率が高さに与える影響

表 1：曲率が高さに与える影響

高さ	l [m]	H [m]
高さ 0.01mm まで読定可能 (実質精度は 0.05 ~ 0.10mm 程度)	50	0.20
	100	0.79
	200	3.15
	300	7.08
	400	12.58
	500	19.66
	1000	78.64

高さ方向をアライメントしなければならない。

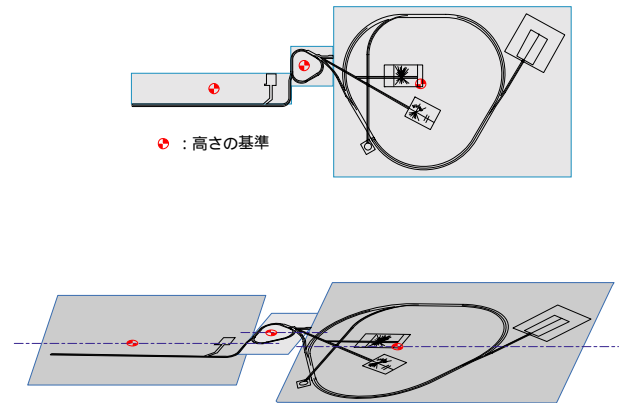


図 5：高さの基準面の設定

また、高さ方向の曲率の調整量を最少にするために代表的な施設ごとに、図 5 のように高さの基準面を設定することが望ましい。

(3) 平面上にアライメントしたときの各機器の傾き

図 6 のように各機器の高さ方向を平面上にアライメントして、水平にアライメントした場合、ビームに対して各機器は傾いて設置されたことになる。

図 6 はビームの進行方向に対する上下方向、すなわちピッチング (pitching) であるが、図 7 のようなビームの進行方向に対する回転方向、すなわちローリング (rolling) してアライメントされている。ピッチングはキック成分となり、ローリングはスキュー成分となるため、その傾斜量

を検討しなければならない。

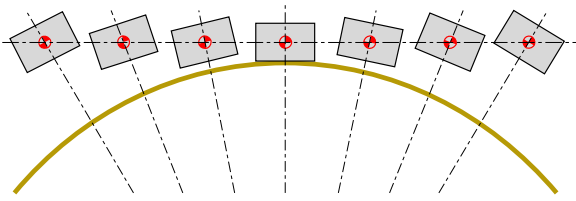


図 6：平面上の機器の傾きの模式図（その 1）

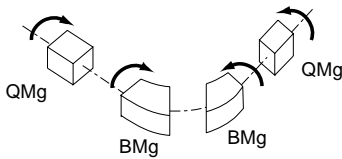


図 7：平面上の機器の傾きの模式図（その 2）

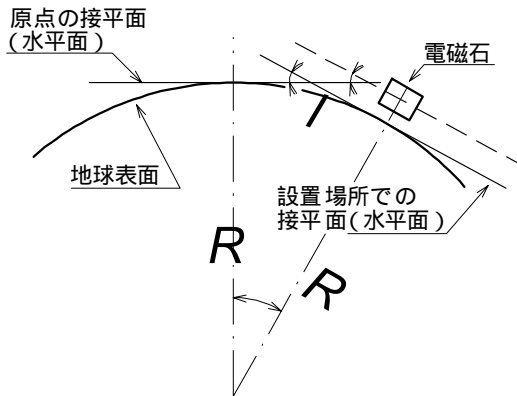


図 8：機器の傾斜量の模式図

その傾斜量は、原点からの経度、緯度の差に等しい。図 8 のように接平面を設定すると、ジオイドが均一であれば、水平面と近似できる。したがって、接平面の傾斜に等しく、その傾斜量は経度、緯度の差に等しい。また、原点からの水平距離は地球表面上の弧長に近似できる。この関係から傾斜量を求めた。傾斜量の許容量を 1m で 0.1mm の傾き、すなわち 0.1 [mrad]とすると、600m で 0.09[mrad]となり、700m で 0.11[mrad]である。

3GeV 中心から施設の南北端まで 500m 程度なので、傾斜の許容誤差以内である。したがって、設定した平面直角座標系と水平面の傾斜の補正は不要である。

3 測量結果

以上の検討結果を踏まえて測量を実施した

3.1 カミオカンデとのリンク

J-PARC 内の基準点からカミオカンデ中心までの測量は、カミオカンデまでのトンネル坑口基準点に対して、GPS 測量によって実施され、トンネル内をトラバース測量によって実施された。その結果、カミオカンデ中心の座標を 50[mm]の精度で得ることができた。図 9 は、J-PARC 中心とカミオカンデ中心の距離関係である。各中心における

鉛直線が異なるため、見る方向によって距離が異なる。

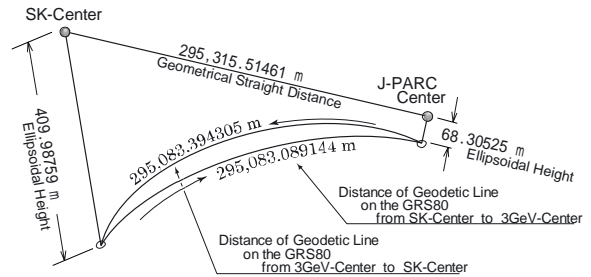


図 9：3GeV 中心とカミオカンデ中心の距離関係

3.2 J-PARC 内の測量

J-PARC 内の測量は、国土地理院の電子基準点を既知点とし、GPS によって測量した。図 10 は、誤差楕円図であり、全点 2[mm]以内の精度で基準点が求められている。

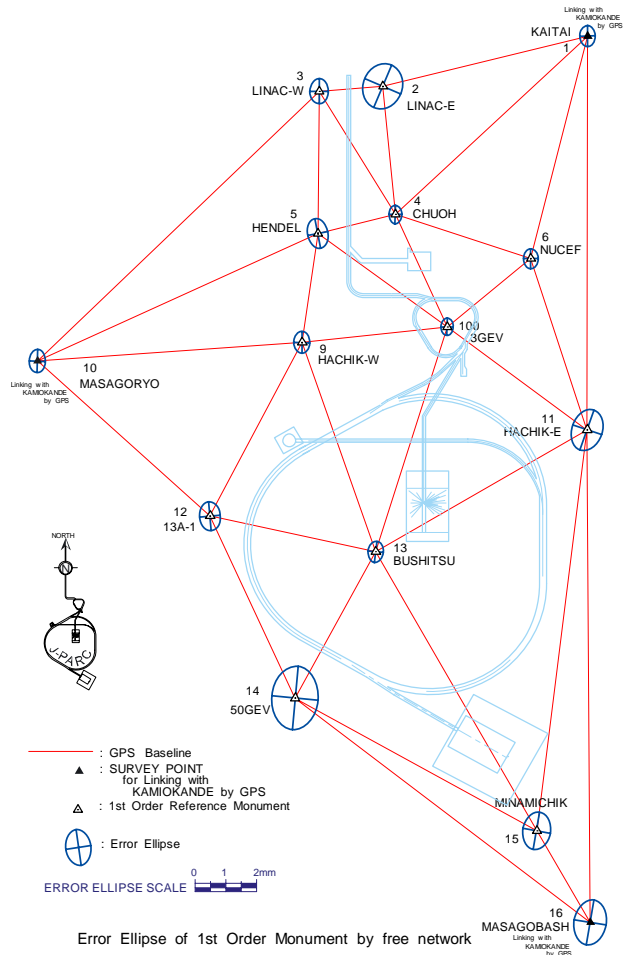


図 10：誤差楕円図

参考文献

[1] 株式会社パスコ、「大強度陽子加速器測量計画作業報告書」, 2003 年 2 月